

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE MICROBIOLOGIE & BIOCHIMIE

N°:



DOMAINE : SCINCES DE LA NATURE ET DE LA VIE

FILIERE : SCIENCES BIOLOGIQUES

OPTION : MICROBIOLOGIE APPLIQUEE

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Par : GASSEM ridha

CHOUGUI Mostapha

Intitulé

Les bactériocines de bactéries lactiques : Synthèse bibliographique

Soutenu devant le jury composé de :

| | | |
|------------------------------|-----------------------------------|------------|
| Dr. MEDJEKAL Samir | Université Mohamed Boudiaf M'sila | Président |
| Dr. GUETOUACHE Mourad | Université Mohamed Boudiaf M'sila | Rapporteur |
| Dr. ARIECH Mounira | Université Mohamed Boudiaf M'sila | Examineur |

Année universitaire : 2024 /2025



Dédicace

Je remercie Dieu pour son aide dans la réalisation de ce travail que je dédie à mes parents, mes frères, mon oncle Abdel Hamid, ma femme, mes enfants et sans oublier mon ami Ben Salama Abdel Rahim.

CHOUGUI Mostapha

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers adorables parents

Mes chers frères chacun par son nom

Ma femme, mes enfants : yacine, amine et assil

Et tous mes amis

Et à tous ceux que je connais

GASSEM ridha

Remerciements

Nous tenons à remercier Dieu pour ses bénédictions qui nous ont permis d'achever ce travail, et nous tenons à adresser nos sincères remerciements au docteur Mr GUETOUACHE Mourad qui nous a fourni des conseils constructifs et a fait preuve de patience pour nous permettre d'achever correctement ce travail.

Nous tenons également à remercier les membres du jury Dr. MEDJEKAL Samir et Dr. ARIECH Mounira, et tous les professeurs du département.

Nous tenons également à exprimer notre sincère gratitude et nos remerciements à M. Harrar abdenassar pour son aide.

Sommaire

| | |
|---|-----|
| Résumé | i |
| Liste des abréviations | ii |
| Liste des figures | iii |
| Listes des tableaux..... | iv |
| Introduction..... | 1 |
| Chapitre I : Généralité sur les bactéries lactiques | 2 |
| I.1. Caractéristiques des bactéries lactiques..... | 2 |
| I.2. Principales voies fermentaires des bactéries lactiques | 3 |
| I.2.1. Voie homofermentaire ou EMP..... | 3 |
| I.2.2. Voie hétérofermentaire ou voie des pentoses phosphate | 5 |
| I.3. Classification et taxonomie des bactéries lactiques | 6 |
| I.4. Caractéristiques des principaux genres des bactéries lactiques | 6 |
| I.4.1. Le genre <i>Lactobacillus</i> | 7 |
| I.4.2. Le genre <i>Lactococcus</i> | 9 |
| I.4.3. Le genre <i>Enterococcus</i> | 11 |
| I.4.4. Le genre <i>Streptococcus</i> | 12 |
| I.4.5. Le genre <i>Pediococcus</i> | 13 |
| I.4.6. Le genre <i>Leuconostoc</i> | 14 |
| I.4.7. Le genre <i>Weissella</i> | 14 |
| I.4.8. Le genre <i>Oenococcus</i> | 15 |
| I.4.9. Le genre <i>bifidobactéries</i> | 16 |
| I.4.10. Le genre <i>Tetragenococcus</i> | 17 |
| I.4.11. Le genre <i>Carnobacterium</i> | 18 |
| I.4.12. Le genre <i>Vagococcus</i> | 18 |
| I.4.13. Le genre <i>Aerococcus</i> | 18 |
| Chapitre II : Les bactériocines des bactéries lactiques | 26 |

| | |
|---|----|
| II.1. Définition et caractéristiques principales | 26 |
| II.2. Classification des bactériocines | 26 |
| II.2.1. Class I : Les Lantibiotiquesou (RiPPs)..... | 28 |
| II.2.2. Class II : Les Non-Lantibiotiques | 28 |
| II.2.3. Class III Bactériocines | 28 |
| II.3. Mode d'action..... | 30 |
| II.3.1. Mécanisme d'action des bactériocines de classe I (lantibiotiques) | 30 |
| II.3.2. Mode d'action des bactériocines de classe II | 31 |
| II. 3.3. Mode d'action des bactériocines de classe III | 32 |
| II. 4. Synthèse et régulation | 33 |
| II. 4.1. Synthèse et régulation des lantibiotiques..... | 36 |
| II. 4.2. Synthèse et régulation des bactériocines de classe II | 36 |
| II. 4.3. Synthèse et régulation des bactériocines de classe III | 36 |
| II. 5. Conditions de production | 36 |
| II. 6. Facteurs influençant la production des bactériocines | 37 |
| II. 6.1. Température et pH..... | 37 |
| II. 6.2. Composition du milieu de culture | 37 |
| Conclusion | 39 |
| Références bibliographiques | 41 |
| Annexe | |

المخلص

في سياق هذه المذكرة قمنا بدراسة البكتيريوسينات التي تنتجها بكتيريا حمض اللاكتيك من حيث أنواع هذه الببتيدات وخصائصها التركيبية والتصنيفية والتخليقية والتنظيمية وآليات تأثيرها على الخلايا البكتيرية الممرضة أو الضارة بالأغذية، مما يحفز على استخدام هذه البكتيريوسينات في الحفظ البيولوجي للمنتجات الغذائية كمواد طبيعية تثبط أو تقتل البكتيريا الممرضة وغير المرغوب فيها، وفي صناعة الأدوية لأهميتها في الحفاظ على الصحة.

الكلمات المفتاحية: بكتيريا حمض اللاكتيك، البكتيريوسينات، نشاطية ضد البكتيريا

Abstract

During this memory, we studied the bacteriocins produced by lactic acid bacteria, in terms of the types of these peptides, their structural, taxonomic, synthetic and regulatory properties, and the mechanisms of their effect on bacterial cells that are pathogenic or harmful to food, leading us to use these bacteriocins in the biological preservation of food products as natural substances that inhibit or kill pathogenic and undesirable bacteria, and in the pharmaceutical industry because of their importance in preserving health.

Key words: lactic acid bacteria, bacteriocins, antibacterial activity

Résumé

Au cours de cette mémoire, nous avons étudié les bactériocines produites par les bactéries lactiques, en termes de types de ces peptides, de leurs propriétés structurelles, taxonomiques, synthétiques et réglementaires, et des mécanismes de leur effet sur les cellules bactériennes pathogène ou nuisibles aux aliments, ce qui nous a conduit à utiliser ces bactériocines dans la conservation biologique des produits alimentaires en tant que substances naturelles qui inhibent ou tuent les bactéries pathogènes et indésirables, et dans l'industrie pharmaceutique en raison de leur importance dans la préservation de la santé.

Mots-clés : bactéries lactiques, bactériocines, activité antibactérienne

Liste des abréviations

BL : les Bactérie Lactiques.

EMP : Embden-Meyerhof-Parnas.

G+C : le ratio guanine + cytosine.

Lb : *Lactobacillus*.

LLB : les Bactériocines sans chef.

Man-PTS : La Man-PTS est une protéine transmembranaire impliquée dans le transport du sucre de mannose.

MRS: Man, Rogosa and Sharpe.

O: Oenococcus

PTM : Les modifications post-traductionnelles.

PTS-EII : Désigne les protéines EII des systèmes PTS, qui sont des protéines de transport de sucres essentielles au métabolisme bactérien et jouent un rôle dans la régulation de l'expression génique.

RiPPs : peptides produits par le ribosome et modifiés de manière post-traductionnelle.

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1: Illustration de la voie homofermentaire des bactéries lactiques | 4 |
| Figure 2: Illustration de la voie hétérofermentaire des bactéries lactiques | 5 |
| Figure 3: Arbre phylogénétique des principaux genres de bactéries lactiques et des genres associés, obtenu par analyse des ARNr16S | 7 |
| Figure 4 : Souche de <i>lactobacilles</i> observée par microscopie électronique à balayage | 8 |
| Figure 5: morphologie en microscopie électronique <i>le lactococcus lactis Sub sp</i> | 11 |
| Figure 6: Morphologie en microscopie électronique de <i>Streptococcus thermophilus</i> | 12 |
| Figure 7: Morphologie en microscopie électronique de <i>Pediococcus sp</i> | 13 |
| Figure 8: <i>Leuconostoc mesenteroides</i> au microscope électronique | 14 |
| Figure 9: Photographie couleur au microscope électronique à balayage (MEB) de <i>Bifidobacterium sp</i> | 17 |
| Figure 10: Schéma de classification des bactériocines en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques et structurelles | 27 |
| Figure 11: Schéma du mécanisme d'action des lantibiotiques via l'inhibition de la synthèse de la paroi cellulaire | 30 |
| Figure 12: Schéma du mécanisme d'action des lantibiotiques via l'inhibition de la synthèse de la paroi cellulaire | 31 |
| Figure 13: Les mécanismes d'action des bactériocines de BL | 33 |
| Figure 14: Plusieurs exemples de groupes de gènes de biosynthèse de bactériocines typiques . | 34 |
| Figure 16: Modèle schématique de la biosynthèse des bactériocines avec (A) et sans (B) peptide leader | 35 |

Listes des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1: Classes et propriétés des bactériocines de bactéries lactiques | 29 |
|---|----|

Introduction

Introduction

Ces dernières années, l'étude des bactériocines en tant que composés antimicrobiens naturels a suscité une attention particulière dans l'industrie agroalimentaire (Beleva *et al.*, 2020).

La classification des bactériocines fournit un cadre pour organiser et classer le groupe diversifié de peptides et protéines antimicrobiens produits par les bactéries.

Ce processus a conduit à l'émergence d'importantes classes de bactériocines en raison de leurs propriétés antimicrobiennes distinctes et de leur potentiel industriel (Radis *et al.*, 2020).

Ces bactériocines présentent différents modes d'action sur les cellules microbiennes, entraînant leur mort (García-Gutiérrez *et al.*, 2020).

Dans cette mémoire, nous nous concentrons sur la classification la plus courante des bactériocines en fonction de leurs propriétés physicochimiques et structurales, de leur composition et de leurs mécanismes d'action, en particulier ceux récemment découverts contre les microbes pathogènes et d'altération.

Cela renforce l'utilisation des bactériocines comme agents antimicrobiens dans les industries agroalimentaire et pharmaceutique et stimule la poursuite des études sur ces composés naturels compte tenu de leur importance pour le maintien de la sécurité alimentaire et de santé.

Chapitre I: Généralité sur les bactéries lactiques

Chapitre I : Généralité sur les bactéries lactiques

I.1. Caractéristiques des bactéries lactiques

Le terme bactéries lactiques désigne un groupe de bactéries Gram-positives impliquées dans la production d'acide lactique, métabolite final de la fermentation des sucres.

Les bactéries lactiques sont des micro-organismes procaryotes, hétérotrophes et chimio autotrophes.

Elles sont généralement immobiles, non sporulées et ont des besoins nutritionnels complexes en acides aminés, peptides, vitamines, sels, acides gras et glucides (Dellaglio *et al.*, 1994).

On les trouve dans des environnements riches en nutriments et elles peuvent coloniser de nombreux produits alimentaires tels que les produits laitiers, la viande, le poisson, les plantes, les céréales, les boissons, l'eau et le miel.

On les a également observées dans le processus d'ensilage. Les bactéries lactiques font également partie de la microflore buccale, intestinale et vaginale des humains et des animaux (Saidi, 2020).

Par définition, les bactéries lactiques sont des cellules Gram-positives, en forme de cocci, de bâtonnets ou de cocci en forme de bâtonnet.

Ces cellules sont généralement stationnaires, non sporulées et aérobies ou anaérobies. Elles ne contiennent ni catalase, ni nitrate réductase, ni cytochrome oxydase.

Ces bactéries ont des besoins nutritionnels complexes en glucides fermentescibles, acides aminés, peptides, vitamines et sels. Elles sont classées selon leur morphologie, leur type de fermentation et leur température optimale de croissance (Patel *et al.*, 2010).

Les bactéries lactiques, comme leur nom l'indique, partagent la caractéristique commune et emblématique de produire de l'acide lactique, souvent associé à la fermentation alimentaire. Leur capacité à utiliser plusieurs sources de carbone conduit à la formation d'acide lactique comme seul produit final si elles sont homofermentaires (voie Embden-Meyerhof-Parnass) ou à la synthèse de dioxyde de carbone, d'acide acétique et d'éthanol en plus de l'acide lactique si ces bactéries suivent la voie dite hétérofermentaire ou lactique, également connue sous le nom de voie 6-phosphogluconate ou voie hexose monophosphate (Saidi, 2020)

I.2. Principales voies fermentaires des bactéries lactiques

La croissance nécessite une production d'énergie, et les bactéries lactiques ne font pas exception. Hétérotrophes, elles tirent leur énergie de la fermentation de substrats carbonés.

Les carbohydrates fermentés en acide lactique par les bactéries lactiques peuvent être des monosaccharides tels que des hexoses (glucose, galactose), des pentoses (xylose, ribose, arabinose), hexitols et pentitols (mannitol, sorbitol, xylitol) ou des disaccarides (lactose, saccharose, cellobiose, trehalose).

La fermentation des sucres s'effectue essentiellement en trois étapes :

- le transport du sucre à travers la membrane cellulaire.
- le catabolisme intracellulaire du sucre.
- formation et expulsion extra cellulaire des métabolites terminaux.

Selon les genres ou espèces, les bactéries lactiques utilisent principalement l'une des deux voies majeures du métabolisme des sucres.

Il s'agit des voies homofermentaire (Embden- Meyerhof-Parnas, EMP) et hétéro fermentaire (voie des pentoses-phosphate).

I.2.1. Voie homofermentaire ou EMP

Toutes les bactéries lactiques (à l'exception des genres : *Leuconstoc*, *Oenococcus*, *Weissella* et certains membres du genre *Lactobacillus*) entravent la voie de la glycolyse pour dégrader les hexoses (ex : glucose).

Après son transfert vers la cellule, le glucose subit une phosphorylation pour se transformer en fructose qui est à son tour phosphorylé en fructose 1-6 di-phosphate puis clivé en dihydroxy acétone phosphate et glycéraldéhyde phosphate, ces deux derniers sont convertis en pyruvate.

Le pyruvate est dans une dernière étape réduite en acide lactique qui est le produit unique c'est la fermentation homolactique.

Dans les conditions défavorables telle la limitation du glucose, ces bactéries produisent également l'acide formique, l'acide acétique, l'éthanol et/ou le CO₂ par la voie de fermentation des acides mixtes (Nahal, 2016).

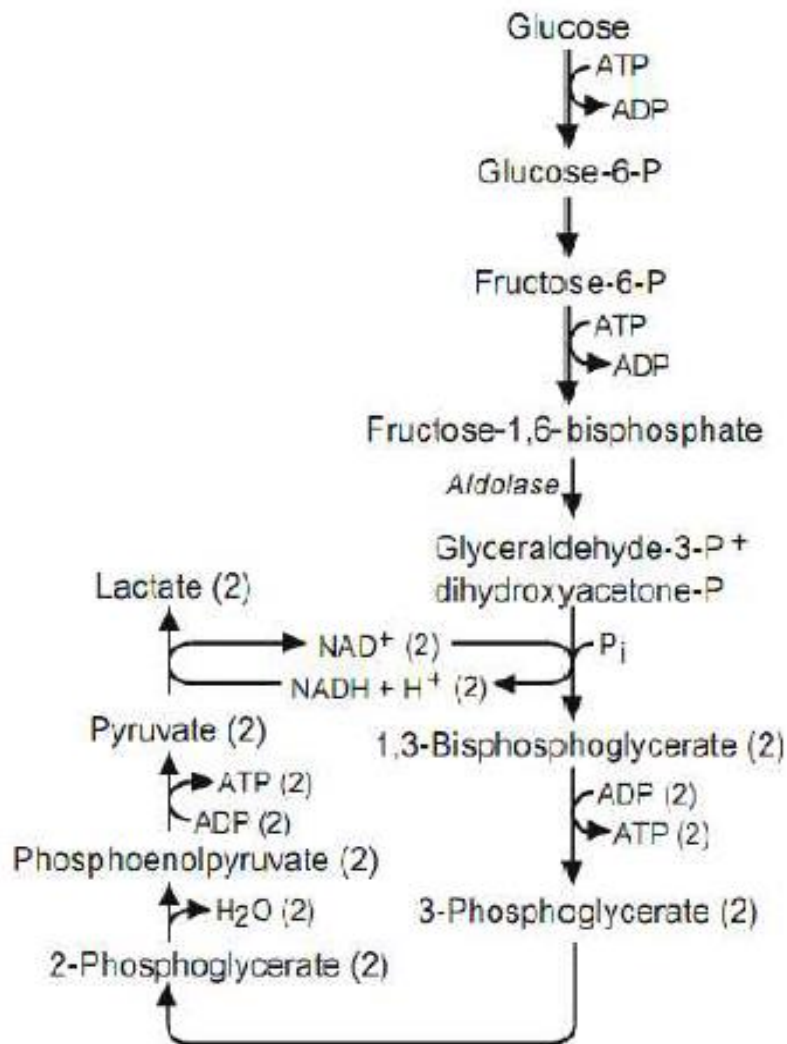


Figure 1: Illustration de la voie homofermentaire des bactéries lactiques (Salminen *et al.*, 2004).

I.2.2. Voie hétérofermentaire ou voie des pentoses phosphate

Les bactéries lactiques qui fermentent le glucose en produisant, en plus de l'acide lactique, de l'acétate, de l'éthanol et du CO₂ sont dites hétérofermentaires.

Les groupes principaux de bactéries présentant ce type de métabolisme sont les *Leuconostoc* et certains *lactobacilles* (Robrish *et al.*, 1994).

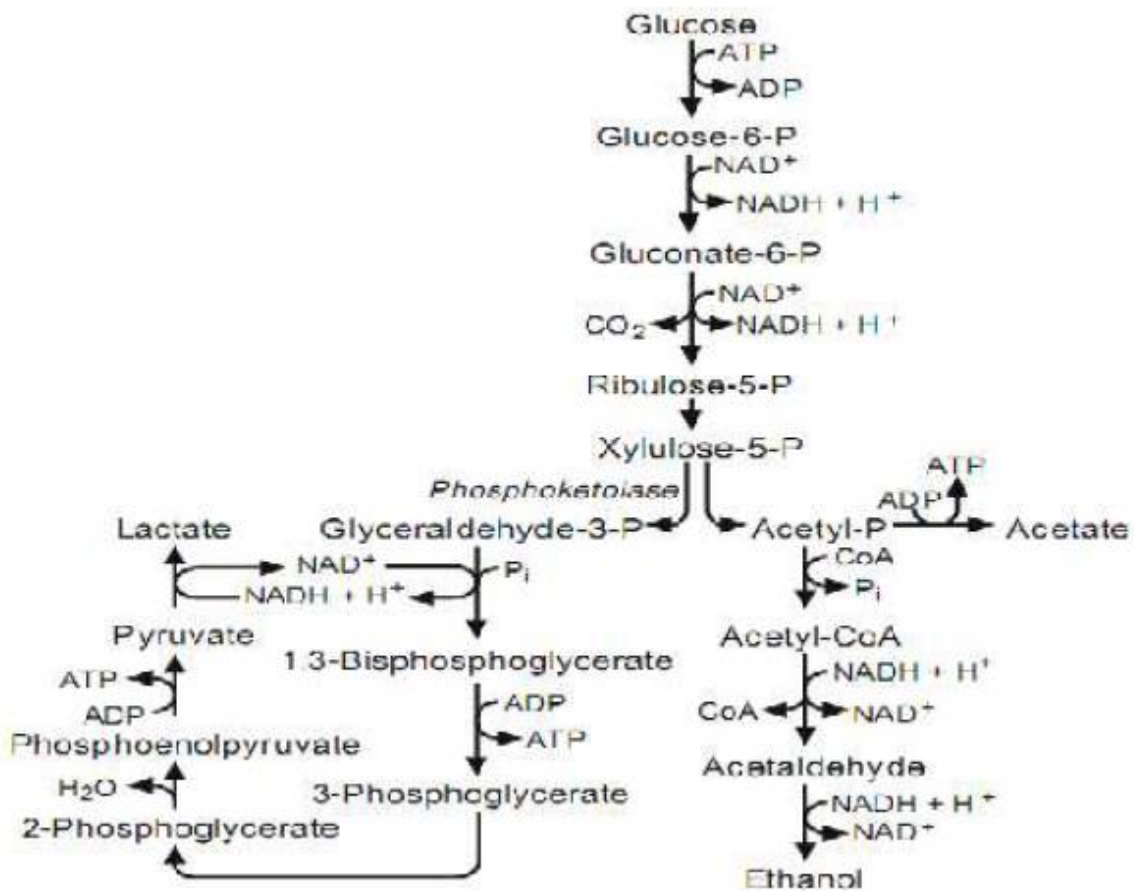


Figure 2: Illustration de la voie hétérofermentaire des bactéries lactiques (Salminen *et al.*, 2004).

I.3. Classification et taxonomie des bactéries lactiques

Traditionnellement, les bactéries lactiques ont été classées en fonction de leurs caractéristiques phénotypiques : morphologie, profil de fermentation du glucose, croissance à différentes températures, isomères d'acide lactique produits et fermentation de différents glucides (Holzapfel *et al.*, 2001).

Cependant, des études basées sur des comparaisons de séquences d'ARN ribosomique 16S ont montré que certaines espèces générées à partir de la caractérisation phénotypique ne sont pas conformes aux relations phylogénétiques proposées.

Par conséquent, certaines espèces sont difficiles à distinguer par leurs caractéristiques phénotypiques (Dworkin *et al.*, 2006).

Par conséquent, les méthodes de taxonomie moléculaire, telles que l'électrophorèse sur gel en champ pulsé (PFGE), la PCR répétée et la RFLP, sont précieuses pour caractériser et détecter les bactéries lactiques (Holzapfel *et al.*, 2001).

D'après les données de séquences d'ADN 16S et 23S, les bactéries Gram-positives sont divisées en deux embranchements.

Un embranchement est constitué de bactéries Gram-positives dont la teneur en G+C est inférieure à 50 % (*Clostridium*), et l'autre de bactéries dont la teneur en G+C est supérieure à 50 % (Actinomycètes) (Holzapfel *et al.*, 2001 ; Durkin *et al.*, 2006).

Les bactéries lactiques typiques ont une teneur en G+C inférieure à 50 %, tandis que le genre *Bifidobacterium*, classé physiologiquement comme bactérie lactique, appartient au clade des Actinomycètes, qui comprend également *Propionibacterium* et *Brevibacterium* (Vandam *et al.*, 1996).

Il existe peu de corrélation entre la classification traditionnelle et la relation évolutive des bactéries lactiques.

Les genres morphologiquement distincts *Lactobacillus*, *Leuconostoc* et *Pediococcus* sont phylogénétiquement mixtes (Schleifer et Ludwig, 1995).

I.4. Caractéristiques des principaux genres des bactéries lactiques

Les techniques de biologie moléculaires ont permis de mettre en évidence une forte diversité génomique qui a conduit à la classification récente de treize genres : *Carnobacterium*, *Enterococcus*, *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Oenococcus*, *Pediococcus*,

Streptococcus, Tetragenococcus, Vagococcus, Weissella, Aerococcus, Bifidobacterium
(Boumediene, 2013).

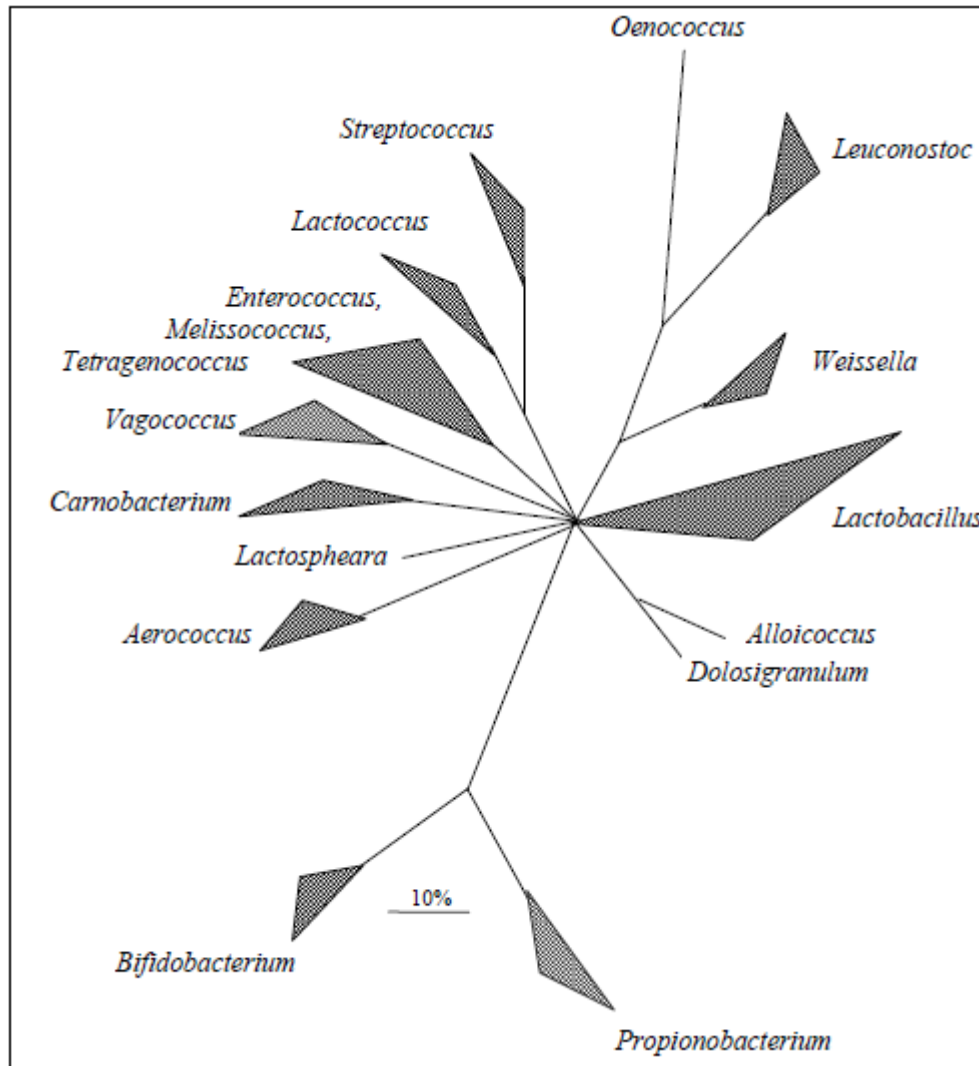


Figure 3: Arbre phylogénétique des principaux genres de bactéries lactiques et des genres associés, obtenu par analyse des ARNr16S (Holzapfel, 2001).

I.4.1. Le genre *Lactobacillus*

Lactobacillus est le genre principal de la famille des *Lactobacillaceae*, qui comprend de nombreuses espèces, impliquées dans les levains lactiques dans de nombreuses industries ou rencontrées comme polluants.

L'assemblage des espèces de *Lactobacillus*, comprenant actuellement au moins 145 espèces reconnues, présente une extrême diversité phylogénétique, phénotypique et écologique (Corrieu et Luquet, 2008).

Ce sont des bactéries Gram positif, de forme allant de bacilles longs et minces aux coccoïdes qui sont des bâtonnets courts ou légèrement incurvés, généralement agrégés en chaînes, ne forment pas de spores et sont généralement immobiles

Les lactobacilles sont catalase négative cependant certains ont une pseudo catalase et sont généralement négatives à la nitrate réductase ainsi qu'à la gélatinase (Siegumfeldt *et al.*, 2000).

I.4.1.1. Caractéristiques culturales et besoins nutritionnels

La plupart des lactobacilles se développent de manière optimale à des températures comprises entre 30 et 40°C.

Certaines souches de *Lactobacillus* dites "thermophiles" survivent à 55°C (Adams et Moss, 2000).

Ils poussent mieux dans des conditions acides, lorsque le pH est d'environ 4,5 à 6,4 mais leur croissance s'arrête lorsque le pH est d'environ 3,5

Les lactobacilles sont microaérophiles ou anaérobies et ont des besoins nutritionnels très complexes en acides aminés, vitamines, acides gras, nucléotides, glucides et minéraux (De Vos *et al.*, 2009).

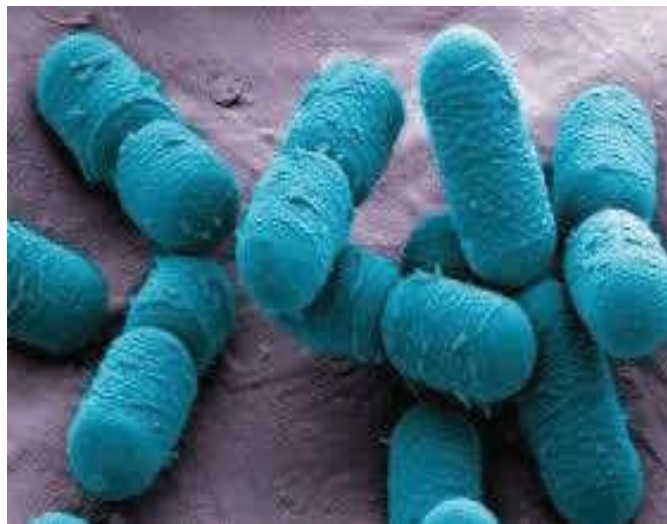


Figure 4 : Souche de *lactobacilles* observée par microscopie électronique à balayage

(Tirée de www.inra.fr)

I.4.1.2. Taxonomie et classification des *Lactobacilles*

Les caractéristiques qui distinguent les trois groupes, ainsi que certaines des espèces les plus connues de chaque groupe.

D'après la classification d'Orla-Jensen (1919) le genre *Lactobacillus* est subdivisé en trois groupes selon leur type fermentaire :

- **Groupe I « Thermobacterium »** : Ce groupe rassemble des espèces homofermentaires obligatoires.

Il est constitué d'espèces thermophiles impliquées dans la fermentation des produits laitiers, par exemple : *Lb. delbrukii* et *Lb. helveticus*, et ceux présents chez l'homme et les animaux qui contribuent à l'équilibre de la microflore de l'organisme, tels que : *Lb. acidophilus* et *Lb. Gasseri*. Ces bactéries ont été cultivées à 45°C.

- **Groupe II « Streptobacterium »** : Ce groupe comprend les espèces hétérofermentaires facultatives. Ces espèces métabolisent les sucres hexoses en acide lactique par la voie homo fermentaire (EMP) et dégradent les sucres pentoses en acide lactique par la voie hétéro fermentaire.

Ils ne produisent pas de CO₂ lors de la fermentation du glucose, mais le font lors de la fermentation du gluconate

Ce groupe est constitué d'espèces mésophiles impliquées dans la fermentation des produits carnés et céréaliers, par exemple : *Lb. curvatus*, *Lb. casei*, *Lb. plantarum*, *Lb. sakei*.

- **Groupe III « Betabacterium »** : Ce sont des Lactobacilles hétérofermentaires obligatoires.

C'est un groupe qui englobe des espèces relativement hétérogènes, notamment des espèces mésophiles telles que: *Lb. de fermentum*, *Lb. brevis*, *Lb. Buchneri* fait partie de la levure de panification et de la flore *Lb. Kéfirisolé* des grains de kéfir.

L'hétérogénéité se reflète dans le type de molécule d'ADN pourcentage GC% des espèces du genre. Les séries varient de 32 à 55 % (Benchenni, 2019).

I.4.2. Le genre *Lactococcus*

Le genre *Lactococcus* comprend sept espèces, morphologiquement les *lactoquoques* sont des coques à Gram positif de 0,5-1,5 µm, formant des chaînes courtes.

Chapitre I: Généralité sur les bactéries lactiques

Elles sont mésophiles, anaérobies facultatives, capables de fermenter les hexoses par voie homofermentaire, produisant de l'acide lactique L (+), et ont des exigences complexes pour sa croissance.

Les *Lactocoque* sont été isolés à partir des végétaux, du lait, ou à partir d'autres sources animales, y compris l'intestin humain (Kubota *et al.*, 2010).

Le genre *Lactococcus* représente les streptocoques dits lactique, se trouve sous forme de coque en paire ou en chaîne de longueur variable.

Ce sont des bactéries anaérobies facultatives homofermentaires ne produisant que de l'acide lactique (+), seul *Lactococcus lactis* sp. *Lactis* biovar. *Diacetylactis* produit le diacétyle.

Leur température optimale de croissance est proche de 30°C, capable de se développer à 10°C mais pas à 45°C.

Elles se développent généralement à 4% de NaCl et à un pH proche de la neutralité, leur croissance d'arrêtant lorsque le pH du milieu atteint 4,5.

Et sont capable de développer à 3% de bleu de méthylène et d'hydrolyser l'arginine (Tamine, 2002).

Quelques espèces produisent des exopolysaccharides et des bactériocines.

Actuellement, le genre *Lactococcus* comprend trois sous-espèces : *Lactococcus Lactis* ssp. *Lactis*, *Lactococcus Lactis* ssp. *Cremoris* et *Lactococcus Lactis* ssp. *Hordniae* (Seules les deux premières interviennent dans la plupart des produits laitiers (Cheurfi & Aouidat, 2021)).

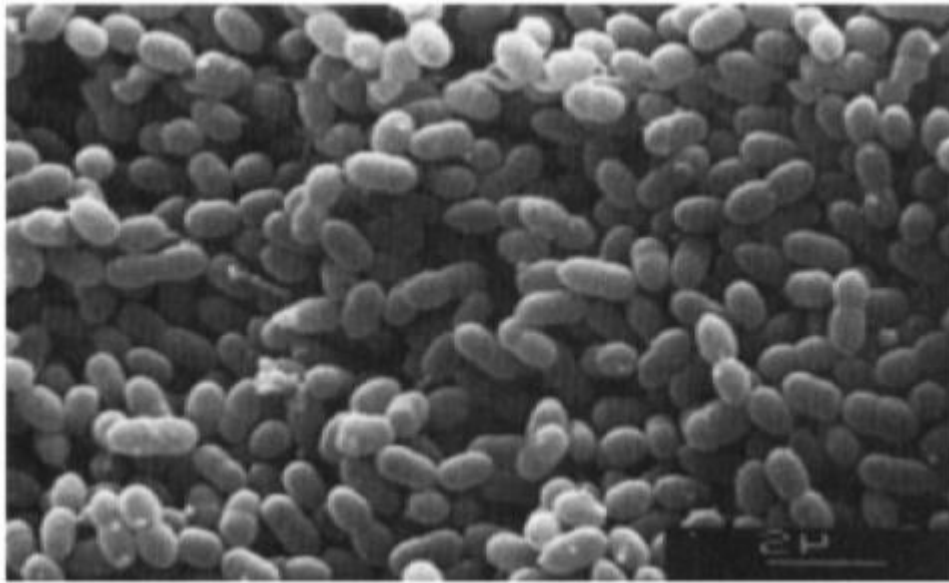


Figure 5: morphologie en microscopie électronique *le lactococcus lactis Sub sp. «Diacetylactis»* (Dworkin *et al*, 2006).

I.4.3. Le genre *Enterococcus*

Les cellules de ce genre sont des coques à métabolisme aéro-anaérobie, à Gram positif, se présentant habituellement sous forme de chaînettes.

Ils sont utilisés comme agents de fermentation homolactique dans les industries alimentaires, mais on les trouve également en tant qu'agent contaminant.

Ce sont des pathogènes opportunistes causant des septicémies, infections urinaires, ou abdominales d'origine intestinale.

Ils sont la cause de plus de 10 % des infections nosocomiales

De plus, les entérocoques ont l'aptitude de résister à des milieux très acides, ce qui leur permet de franchir la barrière estomacale.

Les deux principales espèces de cette famille ont *Enterococcus faecalis* et *Enterococcus faecium* (Amensag, 2019).

I.4.4. Le genre *Streptococcus*

Les cellules de ce genre sont des Cocci sphérique ou ovoïdes qui ont un diamètre inférieur à 2 µm regroupées en paires ou en chaînettes ; en général immobiles, leur fermentation est homofermentaire, elles produisent un certain nombre d'agents antimicrobiens (Cheurfi & Aouidat, 2021).

La seule espèce de *streptocoques* qui soit utilisée en technologie alimentaire est *Streptococcus thermophilus* qui se différencie par son habitat (lait et produits laitiers) et son caractère non pathogène.

La résistance à la température, la capacité de croître à 52°C et le nombre limité de déshydrates de carbones permettent de distinguer les *Streptococcus thermophilus* de la plupart des autres streptocoques (Haddie, 1986 ; Pilet *et al.*, 2005).

Streptococcus thermophilus est isolée du lait pasteurisé, du matériel de laiterie et de vases artisanaux (Boumediene, 2013).

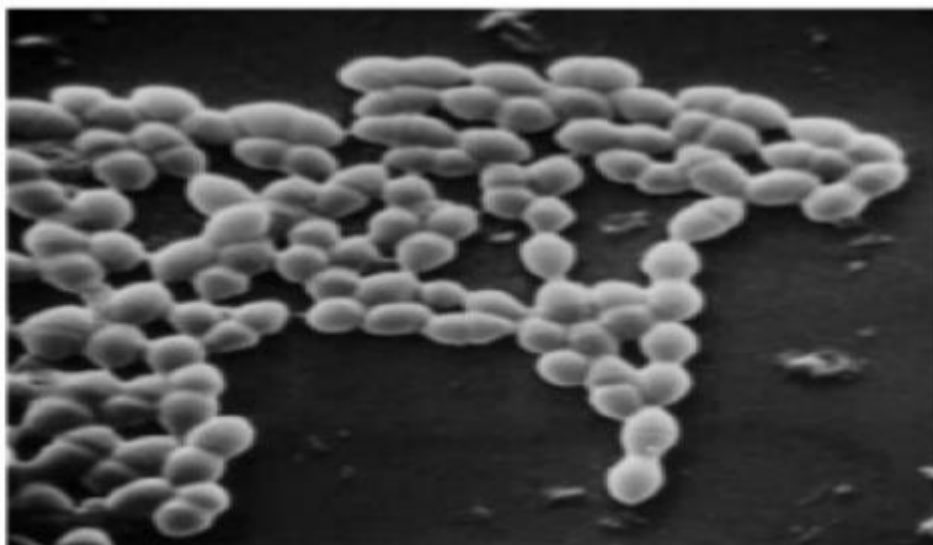


Figure 6: Morphologie en microscopie électronique de *Streptococcus thermophilus* (Cheurfi & Aouidat, 2021)

I.4.5. Le genre *Pediococcus*

Les cellules de ce genre sont sphériques, disposées le plus souvent en tétrades et sont rarement isolées.

Les pédiocoques sont des microaérophiles qui fermentent le glucose en conditions anaérobies en acide DL ou L (+) -lactique, catalases négatives.

La fermentation des glucides est hétérofermentaire, c'est-à-dire qu'elle ne produit pas de CO₂ à partir du glucose (Dworkin *et al.*, 2006).

Selon les espèces, leurs températures optimales de croissance se situent entre 25°C et 40°C.

N'ayant pas le pouvoir de métaboliser le lactose, la plupart d'entre elles sont incapables d'acidifier et de coaguler le lait.

Ces bactéries se distinguent des autres bactéries lactiques par leurs sensibilité à la température, au pH et à la concentration en NaCl et sont représentées par l'espèce type : *Pediococcus damnosus* (Taiba *et al.*, 2022).

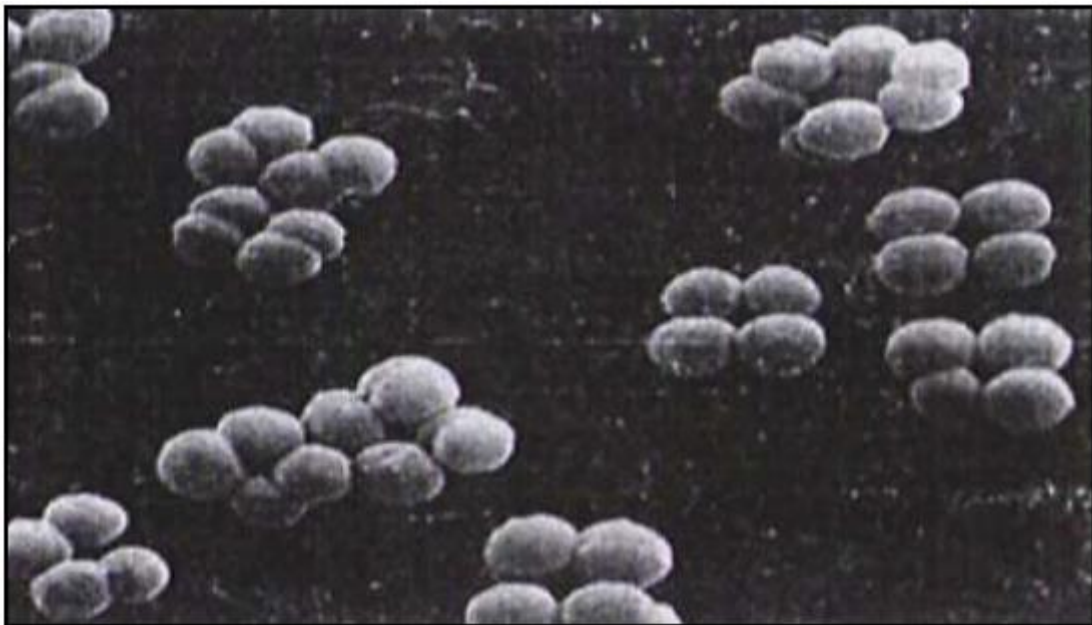


Figure 7: Morphologie en microscopie électronique de *Pediococcus* sp. (Taiba *et al.*, 2022).

I.4.6. Le genre *Leuconostoc*

Les *Leuconostocs* sont des bactéries à Gram positif, immobiles, asporulées, dépourvus d'oxydase et de catalase, anaérobies facultatifs avec une forme ovoïde, de la famille des *Leuconostocaceae* et de l'ordre *Lactobacillales*, associées en paire ou en chaînes courtes, elles sont exigeantes du point de vue nutritionnel et leur croissance est toujours lente, dont leurs optimums de croissance est de 20 à 30 °C caractérisées par un métabolisme hétérofermentaire, ils produisent de l'acide lactique, du CO₂ et de l'éthanol (Chadi & Terchi, 2023).

Leuconostoc n'est généralement pas considéré comme faisant partie de flore humaine bien que des souches ont été isolées à partir de déchets humains, des échantillons vaginaux et des échantillons de lait maternel.

Les espèces couramment trouvées dans le lait et les fromages fabriqués au lait cru sont les espèces *Leuconostoc mesenteroides*, puis *Leuconostoc citreum* (Hansal, 2015).

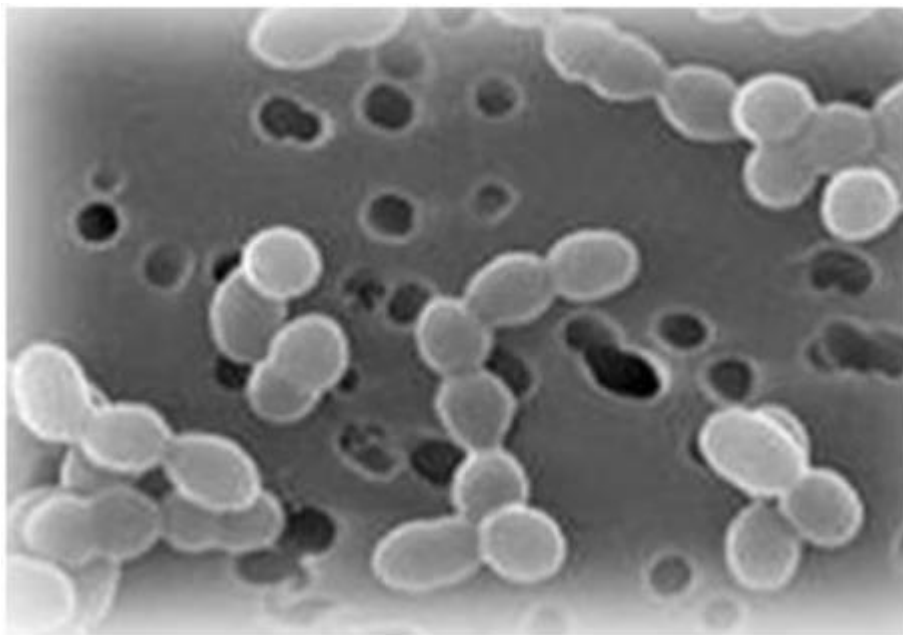


Figure 8: *Leuconostocmesenteroïdes* au microscope électronique (Wallace *et al*, 2003).

I.4.7. Le genre *Weissella*

Les bactéries appartenant au genre *Weissella* sont des cellules Gram positives, catalase négatives, non sporulées, de morphologie coccoïde ou en bâtonnet.

Les espèces de *Weissella* appartiennent à l'embranchement des *Firmicutes*, à la classe des *Bacilli*, à l'ordre des *Lactobacillales* et à la famille des *Leuconostocaceae*.

Les bactéries *Weissella* sont des chimio organotrophes anaérobies facultatives avec un métabolisme fermentaire obligatoire.

Elles ne possèdent pas de cytochromes et fermentent le glucose de manière hétérofermentaire via les voies de l'hexose-monophosphate et de la phosphocétolase.

Les produits finaux de l'hétérofermentation du glucose comprennent l'acide lactique (certaines espèces ne produisant que les énantiomères D (–) et d'autres les deux), le gaz (CO₂) et l'éthanol et/ou l'acétate (Collins *et al.*, 1993).

Toutes les espèces se développent à 15 °C et certaines peuvent atteindre 42–45 °C.

La production de dextrane, l'hydrolyse de l'esculine et la production d'ammoniac à partir de l'arginine sont des caractéristiques variables selon les espèces et peuvent être utilisées comme tests phénotypiques pour faciliter l'identification des espèces.

Il en va de même pour la fermentation de sucres tels que le cellobiose, le fructose, le galactose, le lactose, le maltose, le mélibiose, la raffinose, le ribose, le saccharose, le tréhalose et le xylose (Fusco *et al.*, 2015).

I.4.8. Le genre *Oenococcus*

Jusqu'à présent représenté par une seule espèce, *Oenococcus oeni*, dont l'homogénéité phylogénétique a été démontrée par Zavaleta *et al.*

Oenococcus oeni est une bactérie à gram positif dont les cellules arrondies forment des chainettes plus ou moins longues selon les souches et les conditions du milieu.

Présente initialement sur la baie de raisin, elle passe inaperçue car sa population est très faible.

Il a ainsi fallu passer par des étapes d'enrichissement pour l'observer (Renouf *et al.*, 2007).

O. oeni se retrouve également sur d'autres fruits comme la pomme et la poire.

Elle participe aussi au processus de l'élaboration du cidre et du poiré. *O. oeni* est une bactérie hétérofermentaire.

Elle dégrade le glucose par la voie des pentoses phosphates et qui aboutit à la formation d'acide lactique, d'acide acétique, d'éthanol et de CO₂.

Le fructose et divers pentoses sont également fermentés.

Lorsque le fructose est métabolisé, une partie est fermentée et l'autre est réduite en mannitol.

Dans ce cas, la production d'éthanol est limitée car le NADH nécessaire est déjà réoxydé par la réaction de production du mannitol (Bridier, 2011).

I.4.9. Le genre *bifidobactéries*

Les *bifidobactéries* sont des bacilles à gram positif, non mobiles, ne produisent pas de gaz et ne forme pas de spores.

Elles sont des anaérobies mais quelques espèces tolérant l'O₂ dans la présence ou non du CO₂.

Ces dernières sont dépourvues de la catalase, le contenuen G+C est de 61% (Boudaoued & Sehaki, 2021).

Les conditions optimales de croissance des *bifidobactéries* d'origines humaine se situent à des températures comprises entre 37°C et 41°C, et des valeurs de pH entre 6,5 et 7.

Les *bifidobactéries* forment le plus important groupe de bactéries intestinales pour la santé de l'homme.

Elles s'installent juste après la naissance et deviennent dominantes dans la microflore intestinale du nouveau-né.

Ces bactéries peuvent inhiber les coliformes, les entérocoques et les clostridies par leurs produits de métabolisme ou par l'utilisation des nutriments présentes dans les zones de fixation sur le mur intestinal.

Seulement ces microorganismes sont nutritionnellement prétentieux, leur culture nécessite des facteurs de croissance et spécifiques (Hadadji, 2007).

Certaines propriétés des *bifidobactérie* sont favorisé leur utilisation dans des produits alimentaire sappelés probiotiques, tels que les laits fermentés, fromages et le lait en poudre (Yann, 2003)

Pour y remédier a ces pertes certaines espèces de *bifidobacterium* d'origines humaines (*Bifidobacterium longum*, *Bifidobacterium bifidum*, *Bifidobacterium breve* et *Bifidobacterium infantis*) et une espèce d'origine animal *Bifidobacterium animalis* ou *lactis*, sont intégrés dans les laits fermentés (Biavati *et al.*, 2000).

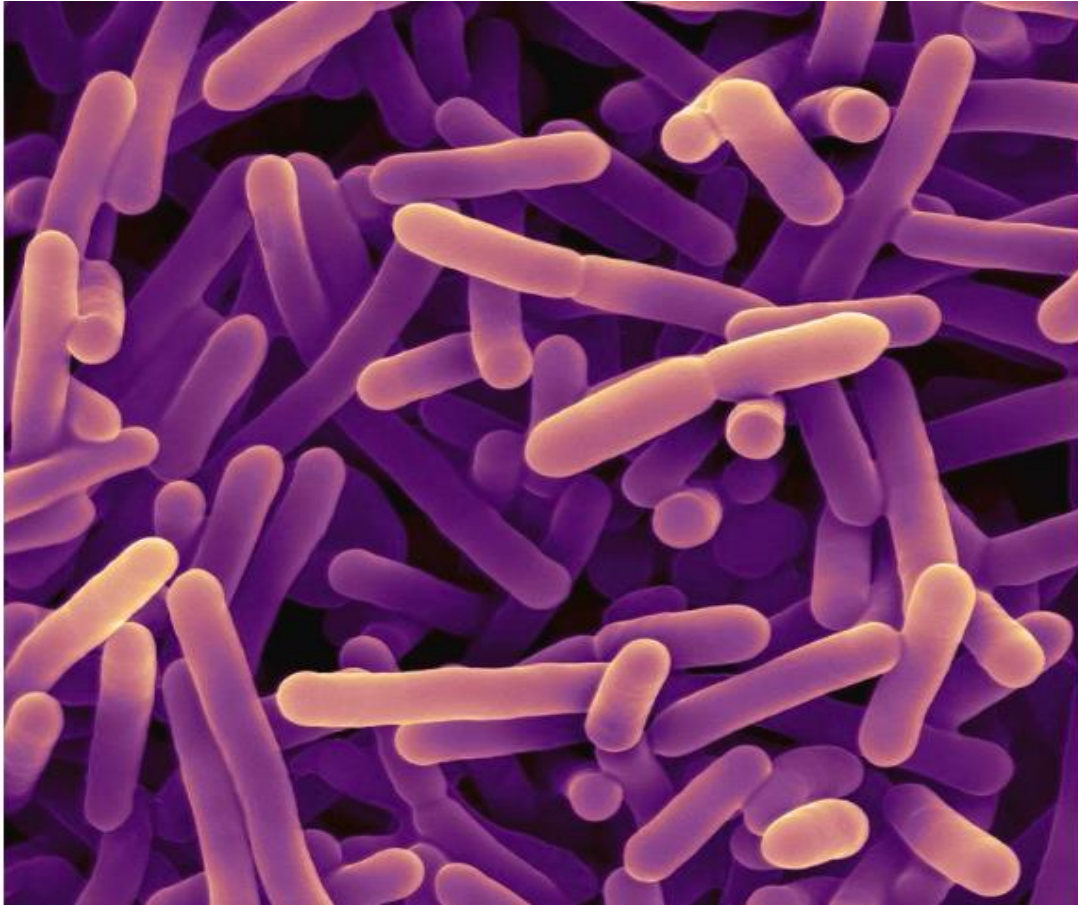


Figure 9: Photographie couleur au microscope électronique à balayage (MEB) de *Bifidobacterium sp.* (<https://sciencephotogallery.com/>)

I.4.10. Le genre *Tetragenococcus*

Les *Tetragenococcus* sont des bactéries lactiques typiques : elles sont Gram positives, catalase négatives et oxydase négatives.

Elles se développent dans des conditions aérobies facultatives à microaérophiles.

Elles sont homofermentaires et produisent de l'acide lactique, mais pas de CO₂, à partir du glucose, et ne sont pas capables de réduire les nitrates.

Les cellules uniformément sphériques ne sont jamais ovoïdes ni allongées (Dworkin *et al.*, 2006).

Seulement deux espèces de *Tetragenococcus* sont connues *Tetragenococcus Halophilus* précédemment considérées comme *Pe. Halophilus* et *Te. muriaticus*.

Les *Enterococcus solitarius* sont phylogénétiquement liés au *Tetragenococcus*.

Ces bactéries résistent à des concentrations élevées en sel (supérieures à 18 % NaCl) et en sont dépendantes pour leur croissance.

Les espèces *Tetragenococcus* ont un rôle crucial dans la fabrication des produits alimentaires à concentration de sel élevée par exemple les sauces de soja (Nahal, 2016).

I.4.11. Le genre *Carnobacterium*

Sont des bacilles hétérofermentaires, anaérobies, catalase négative, souvent trouvés dans les viandes de bœuf, de poisson et de la volaille emballées sous vide et stockées à basse température.

Ce genre contient plusieurs espèces dont les principales sont : *Carnobacterium divergens*, *Carnobacterium carnis* et *Carnobacterium piscicola*.

Les *Carnobacterium divergens* sont des bio-conservateurs contre les *Listeria monocytogènes*, et les *Carnobacterium piscicola* ont un rôle principal dans la formation de la saveur des saucisses fermentées (El idrissi, 2017).

I.4.12. Le genre *Vagococcus*

Sont des coques à gram positif, anaérobies, catalase négative, homofermentaires, peuvent croître entre 10 et 45 °C, ils se trouvent principalement dans le poisson, les matières fécales et l'eau.

Les espèces du genre *Vagococcus* sont facilement confondues avec les *lactocoques* au niveau morphologique, mais ces deux genres sont clairement distincts par leur composition en acides gras.

Les amorces d'oligonucléotides rendent l'identification de ce genre fiable et réalisable (Ammor, *et al.*, 2005).

I.4.13. Le genre *Aerococcus*

Sont des coques groupées en tétrades contenant cinq espèces et moins intéressantes en agro alimentaire (Elidrissi, 2017).

Chapitre II :
Les bactériocines des
bactéries lactiques

Chapitre II : Les bactériocines des bactéries lactiques

II.1. Définition et caractéristiques principales

Les bactériocines sont une classe de peptides ribosomiques antimicrobiens synthétisés par les bactéries.

Elles peuvent tuer ou inhiber des souches bactériennes apparentées ou non, mais elles ne nuisent pas aux bactéries elles-mêmes grâce à des protéines immunitaires spécifiques.

La capacité des bactériocines à détruire les bactéries est une stratégie efficace pour maintenir leurs populations et limiter leurs concurrents, leur permettant ainsi d'obtenir davantage de nutriments et d'espace vital dans divers environnements (Yang *et al.*, 2014).

Les bactériocines présentent des propriétés diverses en termes de biochimie, de poids moléculaire, de mécanisme d'action, de spectre d'activité et de séquence d'acides aminés.

Elles sont produites par des bactéries Gram-positives et Gram-négatives. Les bactéries Gram-positives et Gram-négatives sécrètent des bactériocines, qui diffèrent par leur taille, leur structure, leur origine génétique, leurs propriétés biochimiques, leurs mécanismes d'action et leurs récepteurs cellulaires cibles (Darbandi *et al.*, 2022 ; Fisher *et al.*, 2024).

II.2. Classification des bactériocines

En général, les bactériocines peuvent être classées en deux classes principales, la classe I et la classe II, en fonction de la présence ou de l'absence de peptides modifiés post-traductionnellement.

À ce jour, plusieurs classifications des bactériocines de BL ont été proposées, basées sur de nombreuses études, telles que le système de classification de Rubin et Torres (2024) et de Soltani *et al.* (2021).

Malgré l'identification croissante de nouvelles bactériocines, les classes I et II représentent toujours les groupes dominants, qui sont classés selon que les produits naturels subissent ou non des modifications peptidiques post-traductionnelles (RiPP) (Sugrue *et al.*, 2024).

Cependant, il convient de noter que la classification la plus courante des bactériocines est basée sur leurs propriétés physico-chimiques et structurales, qui sont divisées en trois classes (Bahramie *et al.*, 2024). (Figure 10).

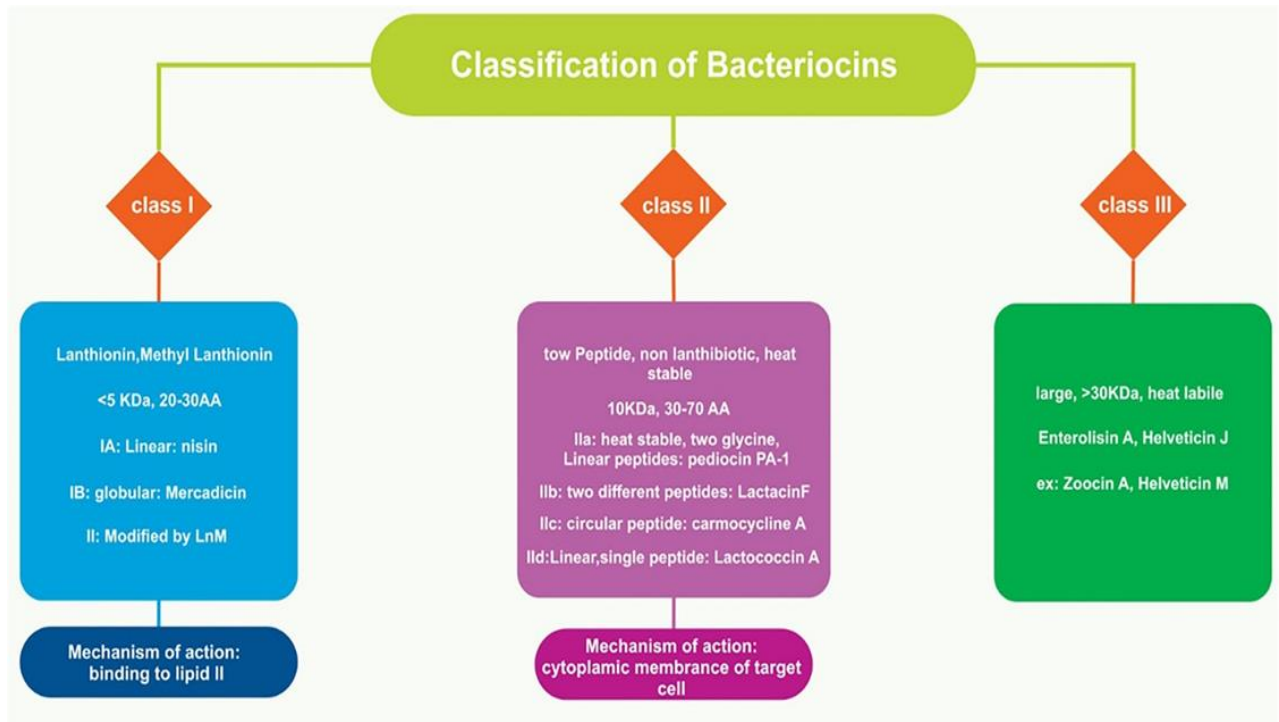


Figure 10: Schéma de classification des bactériocines en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques et structurelles (Bahrami *et al.*, 2024).

II.2.1. Class I : Les Lantibiotiquesou (RiPPs)

Également connus sous le nom de lantibiotiques, ce sont des molécules d'un poids moléculaire inférieur à 5 kDa, thermostables et présentant une grande abondance de modifications post-traductionnelles.

Leur structure présente une forte proportion de certaines structures d'acides aminés telles que la lanthionine et la méthyl-lanthionine (qui a donné son nom à cette classe); outre les acides aminés insaturés (Zimina *et al.*, 2020).

II.2.2. Class II : Les Non-Lantibiotiques

Les bactériocines de classe II ou non lantibiotique est petite (< 10 kDa) et flexible (Hernández-González *et al.*, 2021).

Ce peptide contient 30 à 60 acides aminés ; il est chargé positivement ; il est dépourvu de lanthionine (Hassan *et al.*, 2020).

Elles sont thermostables, non modifiées et généralement classées en sous-catégories en fonction de leurs structures et de leurs séquences d'acides aminés, notamment IIa, IIb, IIc et IId (Singhal *et al.*, 2023; Yi *et al.*, 2022) :

Sous-classe IIa: couvre les peptides ayant une activité contre *Listeria* (genre bactérien pathogène à l'origine de maladies d'origine alimentaire). tels que la pédiocine PA-1 et la sakacine A (Negash & Tsehai, 2020).

Sous-classe IIb avec bactériocines à deux composants dans lesquelles deux peptides distincts agissent en synergie pour générer un effet antimicrobien, comme la lactation F et les lactocoquesG.

Subclass IIc: inclut les peptides à structure circulaire (Sharma *et al.*, 2021).

Sous-classe IId: comprend les peptides linéaires qui n'ont pas d'activité contre *Listeria* (Sharma *et al.*, 2021).

II.2.3. Class III Bactériocines

Les bactériocines de classe III sont des peptides de poids moléculaire élevé (>30 kDa) et des protéines thermolabiles (Yaghoubi *et al.*, 2020).

Les bactériocines de classe III sont divisées en sous-classe IIIa (bactériolysine), IIIb (non lytique) et IIIc (tailocine) (Vishwanatha *et al.*, 2024).

Tableau 2: Classes et propriétés des bactériocines de bactéries lactiques (Mokoena, 2017)

| Class | Typical Producing Species | Properties | Examples (References) |
|-------|---|--|---|
| I | <i>Lactobacillus lactis</i> <i>subsp. lactis</i> | Contient des acides aminés uniques, c'est-à-dire la lanthionine et la méthyllanthionine ; < 5 kDa | nisin, lactocin, mersacidin |
| IIa | <i>Leuconostoc gelidum</i> | Peptides cationiques hydrophobes, thermostables, non modifiés ; contiennent un peptide leader à double glycine ; peptides de type pédiocine ; < 10 kDa | pediocin PA1, sakicin A, leucocin A |
| IIb | <i>Enterococcus faecium</i> | Nécessite la synergie de deux peptides complémentaires ; principalement des peptides cationiques | lactococcin G, plantaricin A, enterocin X |
| IIc | <i>Lactobacillus acidophilus</i> | Affecte la perméabilité membranaire et la formation de la paroi cellulaire | acidocin B, entereocin P, reuterin 6 |
| III | <i>Lactobacillus helveticus</i> | Thermolabiles ; peptides de grande masse moléculaire ; > 30 kDa | lysostaphin, enterolysin A, helveticin J |

II.3. Mode d'action

Les bactériocines produites par BL ont une activité antimicrobienne car elles ciblent les cellules bactériennes à Gram positif et à Gram négatif en utilisant différentes voies et récepteurs, par le biais de mécanismes d'action tels que la formation de pores dans la membrane cellulaire et la perturbation de la structure de sa paroi (Öztürk & Şengün, 2024), et la modification de l'expression génique et de la production de protéines dans la cellule (Negash & Tsehai, 2020).

II.3.1. Mécanisme d'action des bactériocines de classe I (lantibiotiques)

Cette classe de bactériocines appartient aux bactériocines à Gram positif; parmi ce groupe, le type le plus courant et le plus connu est les lantibiotiques (classe I) (Fernandes & Jobby, 2022 ; Sharma *et al.*, 2021).

Les antibiotiques ont démontré deux mécanismes différents pour exercer leur fonction de lyse bactérienne: Le premier est la perturbation de la synthèse de la paroi cellulaire ; le second est la formation de pores:

- Perturbation de la synthèse de la paroi cellulaire: Dans ce mécanisme, divers lantibiotiques montrent une activité antibiotique de deux manières principales d'inhiber la synthèse de la paroi cellulaire: La première est la liaison au lipide II ; un exemple de bactériocine qui utilise ce mécanisme est la gallidermine (Mercado & Olmos, 2022; Sharma *et al.*, 2021)

Le deuxième mécanisme implique le blocage de l'intégration du glucose et de la D-alanine dans les protéines de la paroi cellulaire, ce qui bloque la production de peptidoglycane (Figure 11) (Sharma *et al.*, 2021).

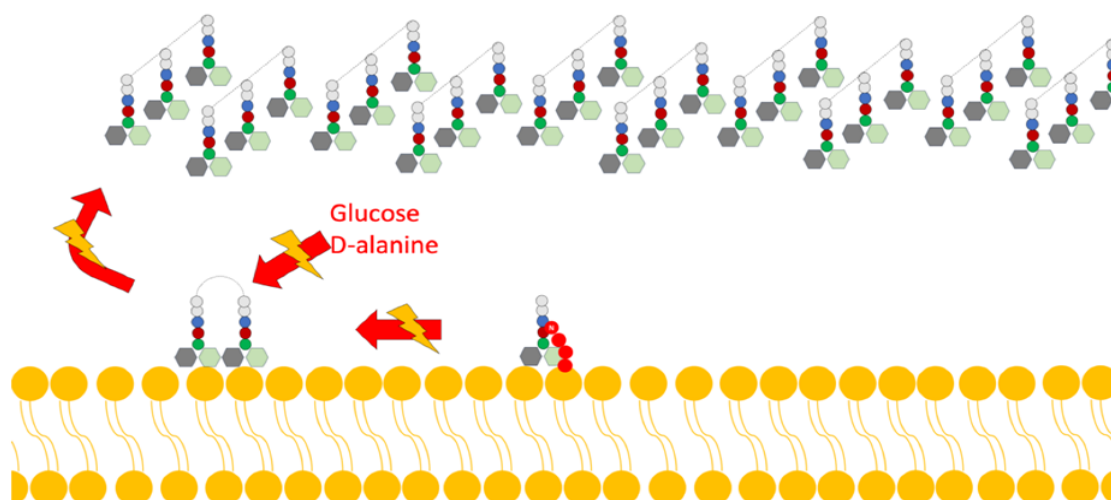


Figure 11: Schéma du mécanisme d'action des lantibiotiques via l'inhibition de la synthèse de la paroi cellulaire (Sharma *et al.*, 2021).

-Formation des pores: la deuxième façon dont les antibiotiques exercent leur activité bactéricide repose sur leur capacité à attaquer l'intégrité de la membrane cellulaire (figure 12).

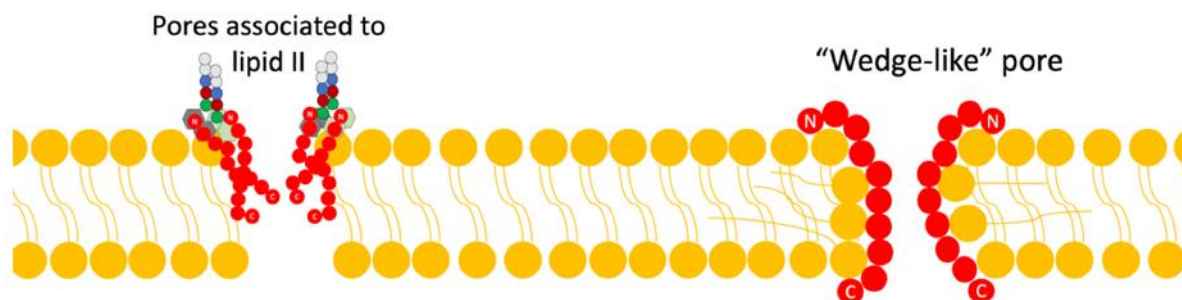


Figure 12: Schéma du mécanisme d'action des antibiotiques via l'inhibition de la synthèse de la paroi cellulaire (Sharma *et al.*, 2021).

Au sein de ce mécanisme, deux modèles sont actuellement proposés :

Le premier est le modèle « barrel-stave », dans lequel la bactériocine se lie parallèlement à la membrane bactérienne ; cette union provoque, par sa différence de charges, une perte de potentiel membranaire et une accumulation d'eau, ainsi que la formation de pores, ce qui conduit à la fuite de solutés et de biomolécules du cytoplasme vers le milieu extérieur (Mercado & Olmos, 2022) .

Le deuxième modèle est le modèle « wedge », dans lequel l'interaction de la bactériocine se fait de manière trans-membranaire, via l'interaction des composants chargés de la bactériocine avec la tête polaire de la bicouche lipidique et l'interaction de la chaîne peptidique avec la queue non polaire de l'acide lipidique.

L'insertion de la bactériocine provoque des déformations de la membrane et des fissures (Antoshina *et al.*, 2022).

II.3.2. Mode d'action des bactériocines de classe II

II. 3.2.1. Class IIa et IIb Bactériocines

De nombreuses bactériocines, en particulier celles de la classe II, sont caractérisées par des propriétés cationiques.

Par conséquent, l'interaction et la rupture de la membrane cytoplasmique bactérienne sont considérées comme cruciales dans le processus de destruction (Soltani *et al.*, 2021).

Les types de cette classe diffèrent par leur mode d'action où les bactériocines de type pédiocine de sous-classes IIa et IIb, telles que la lactococcine A, exercent leur fonction en se liant

à des récepteurs spécifiques tels que le système de mannose phosphotransférase (Man-PTS) situé sur la membrane cellulaire bactérienne, entraînant la formation d'un pore et la rupture du transport du mannose (Li *et al.*, 2023).

II. 3.2.2. Class IIb Bactériocines

Les bactériocines de sous-classe IIb perméabilisent la membrane cellulaire et réduisent les niveaux intracellulaires d'ATP dans les microbes cibles (Bhattacharya *et al.*, 2022).

II. 3.2.3. Class IIc Bactériocines

les bactériocines de sous-classe II agissent directement avec la membrane cellulaire chargée négativement sans avoir besoin de molécules réceptrices (Hernández-González *et al.*, 2021).

II. 3.3. Mode d'action des bactériocines de classe III

Les bactériocines de classe III, telles que l'entérolysine A, induisent l'hydrolyse de la paroi cellulaire ou ciblent spécifiquement des récepteurs.

Les bactériocines peuvent également interrompre des processus cellulaires essentiels tels que l'inhibition de la synthèse des protéines de la membrane externe, l'inhibition de la réplication et de la réparation de l'ADN, l'inhibition de la transcription de l'ARN polymérase et l'inhibition de la traduction par l'obstruction du tunnel de sortie du ribosome 70S (Liang *et al.*, 2025).

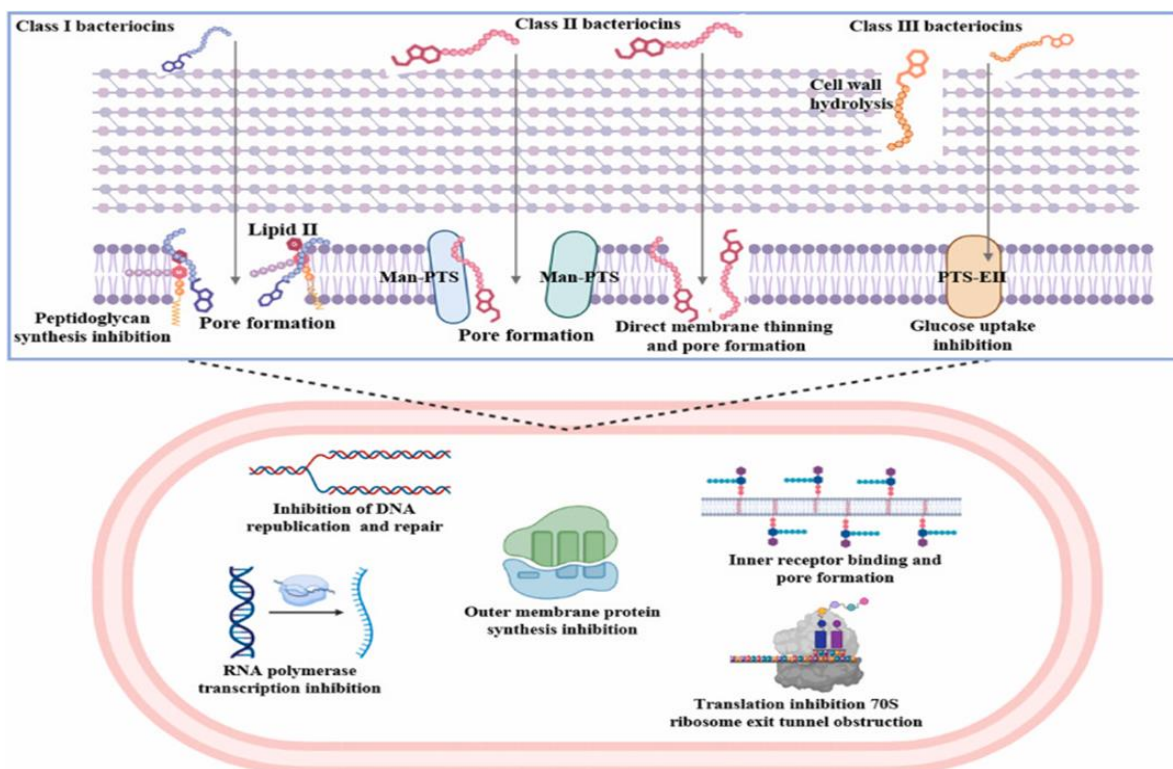


Figure 13: Les mécanismes d'action des bactériocines de BL (Liang *et al.*, 2025).

Les bactériocines de la sous-classe IIIa provoquent la lyse de la paroi cellulaire microbienne cible (Zimina *et al.*, 2020).

Les bactériocines de la sous-classe IIIb interagissent avec des récepteurs spécifiques (PTS-EII) pour bloquer l'absorption du glucose, ce qui entraîne un manque de glucides et provoque la mort cellulaire (Aljohani *et al.*, 2023).

Les bactériocines de la sous-classe IIIc compriment la paroi cellulaire et pénètrent dans le noyau cellulaire, entraînant la formation d'un pore (Zimina *et al.*, 2020).

II. 4. Synthèse et régulation

La biosynthèse des bactériocines produite par BL est un processus hautement organisé et réglementé qui implique plusieurs étapes, notamment la transcription gènes, la traduction des peptides précurseurs, la PTMs, la sécrétion et l'établissement d'une immunité pour protéger la souche productrice (Liang *et al.*, 2025).

La biosynthèse des bactériocines fait intervenir cinq grands types de gènes.

Chapitre II: Les bactériocines des bactéries lactiques

Les gènes de structure codent pour les protéines précurseurs des bactériocines, qui portent généralement une séquence leader N-terminale (Chen *et al.*, 2025).

Les gènes de transport, les gènes de modification et de maturation, les gènes d'immunité (Daba & Elkhateeb, 2024).

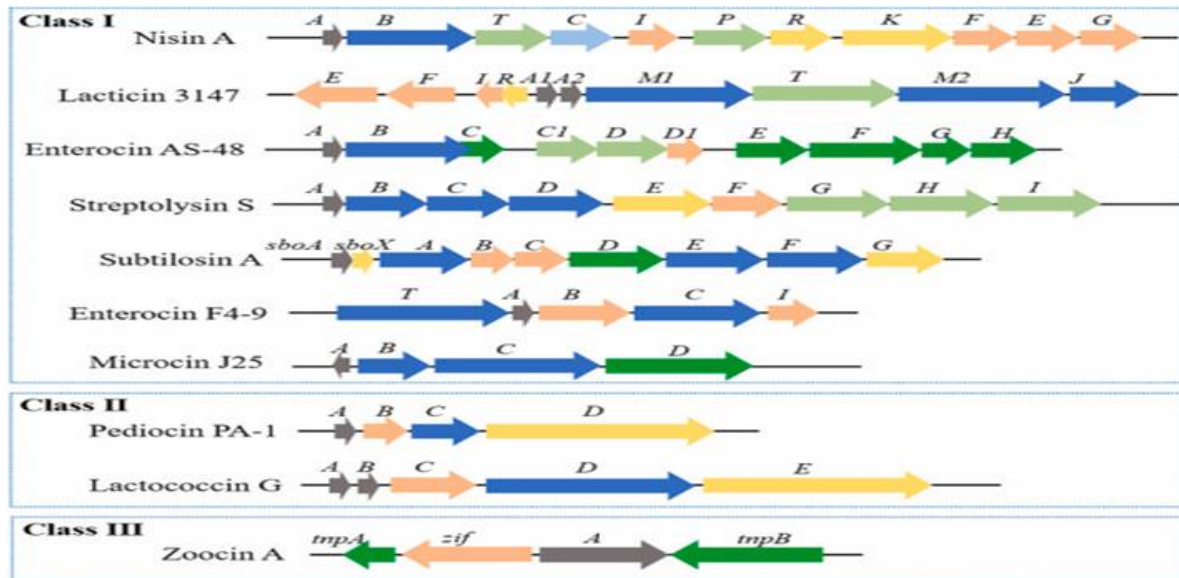


Figure 14: Plusieurs exemples de groupes de gènes de biosynthèse de bactériocines typiques. Les gènes de structure, les gènes de transport, les gènes de modification et de maturation, les gènes d'immunité (Daba & Elkhateeb, 2024).

Chapitre II: Les bactériocines des bactéries lactiques

Selon la présence ou l'absence d'une séquence codant pour un peptide leader dans la séquence génétique des bactériocines, deux catégories de bactériocines sont produites.

La première est synthétisée sous la forme d'un prépeptide avec un peptide leader N-terminal.

Ce peptide leader est ensuite hydrolysé lorsque la bactériocine est exportée à travers la membrane cellulaire, ce qui donne la molécule fonctionnelle (Simons *et al.*, 2020 ; Ladjouzi *et al.*, 2023). (Figure 15(A)).

La deuxième catégorie de bactériocines est synthétisée sans extension N-terminale, et ces bactériocines sont donc appelées « leaderless-bacteriocins » (LLB).

Les LLB n'ont pas de peptide leader, ne subissent pas de modification ou de traitement post-traductionnel et sont supposées être actives immédiatement après leur traduction dans le cytoplasme (Ladjouzi *et al.*, 2023). (Figure 15(B))

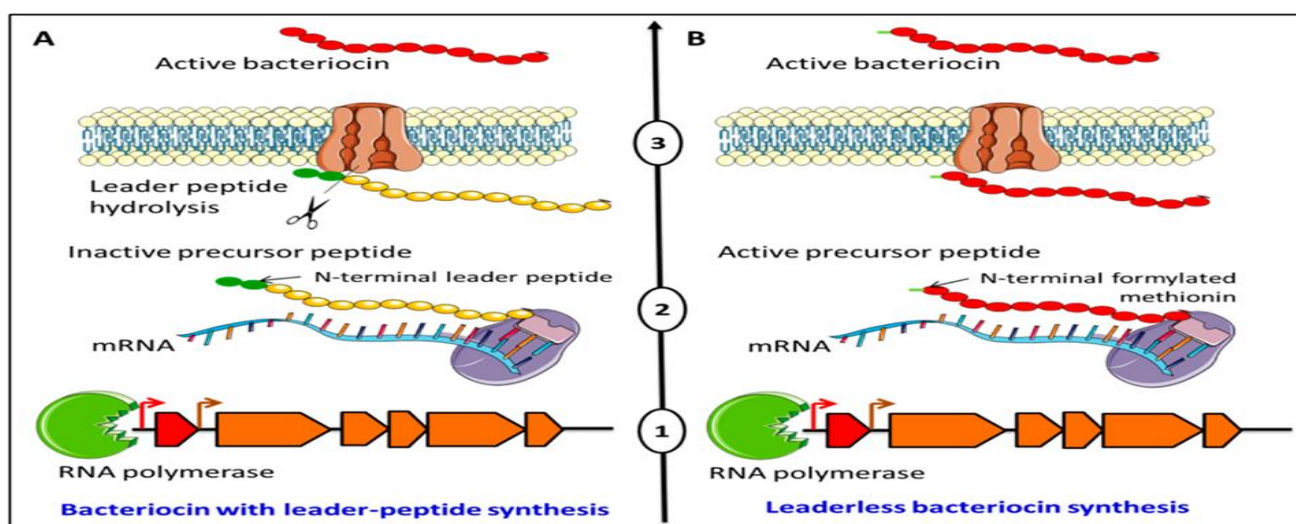


Figure 15: Modèle schématique de la biosynthèse des bactériocines avec (A) et sans (B) peptide leader (Ladjouzi *et al.*, 2023).

Différents mécanismes de régulation ont été décrits et les cellules bactériennes sont capables de réguler la production de bactériocines en fonction de la phase de croissance, de l'état physique de la cellule et de facteurs environnementaux tels que le manque de nutriments, la disponibilité du fer ou l'osmolarité (Arbulu & Kjos, 2024).

II. 4.1. Synthèse et régulation des lantibiotiques

En général, les bactériocines de classe I sont produites sous forme de peptides précurseurs qui subissent d'importantes modifications post-traductionnelles

II. 4.2. Synthèse et régulation des bactériocines de classe II

Ces bactériocines sont le plus souvent synthétisées sous forme de prépeptides dont la séquence leader N-terminale est clivée, la maturation des bactériocines de classe II ne nécessite pas d'enzyme de modification post-traductionnelle à l'exception d'une peptidase leader et/ou d'un transporteur (Pérez-Ramos *et al.*, 2021).

II. 4.3. Synthèse et régulation des bactériocines de classe III

La synthèse de cette classe est étroitement régulée au niveau transcriptionnel, impliquant des promoteurs et des facteurs de transcription spécifiques.

Ces protéines thermolabiles de poids moléculaire élevé subissent des modifications post-traductionnelles, telles que le repliement, l'assemblage ou la glycosylation, avant d'être libérées dans l'environnement (Chen *et al.*, 2025).

II. 5. Conditions de production

La production et l'optimisation des bactériocines de BL impliquent des processus méticuleux, notamment l'isolement, la purification et l'identification, ainsi que des stratégies visant à améliorer l'efficacité de la production (Cui *et al.*, 2021).

Ces peptides antimicrobiens sont dérivés de diverses sources naturelles et font l'objet de tests rigoureux et de raffinements pour atteindre une grande pureté et une caractérisation fonctionnelle.

Des techniques avancées, telles que la chromatographie et le séquençage génétique, sont utilisées pour analyser les structures et les propriétés de ces peptides antimicrobiens (Medeiros-Silva *et al.*, 2018).

En outre, des approches innovantes telles que l'expression hétérologue, l'optimisation des conditions de culture et les modifications génétiques sont essentielles pour maximiser le rendement et l'efficacité des bactériocines (Hussain *et al.*, 2023).

II. 6. Facteurs influençant la production des bactériocines

La production de bactériocines par les bactéries est influencée par divers facteurs, tels que les conditions de culture et la formulation du milieu de culture.

Des variables telles que le pH, la température, l'aération et l'agitation peuvent avoir des effets positifs ou négatifs sur le processus de production (Contessa *et al.*, 2025).

II. 6.1. Température et pH

Le pH et la température influencent l'activité enzymatique et la croissance des souches bactériennes, ce qui a une incidence directe sur le rendement des bactériocines. (Sidooski *et al.*, 2019).

Les variations de température dans la culture microbienne ont un impact significatif sur la croissance cellulaire et la production de bactériocines, car chaque micro-organisme a une plage de température optimale pour son développement et son métabolisme (Contessa *et al.*, 2025).

La température pour la production de bactériocines par la culture de *lactobacilles* se situe généralement autour de 37 °C (Li *et al.*, 2022).

Les conditions optimales pour la production de bactériocines ont été déterminées lorsque les BL sont cultivées dans un bouillon MRS à pH 6,2 (Yang *et al.*, 2018).

II. 6.2. Composition du milieu de culture

La composition du milieu de culture est un facteur critique pour la production de biomasse et de composés bioactifs (Contessa *et al.*, 2025).

Les sources de carbone et d'azote sont essentielles au développement microbien et constituent également des facteurs clés dans la production de métabolites secondaires (Liu *et al.*, 2022)

Conclusion

Conclusion

Les bactéries lactiques jouent un rôle vital dans de nombreux processus biologiques et domaines industriels.

Elles sont essentielles dans la production d'aliments fermentés, où elles contribuent à améliorer la qualité des produits alimentaires et à renforcer leurs bien faits pour la santé.

Quant aux bactériocines, qui sont des protéines antibactériennes produites par certaines souches de bactéries lactiques, elles représentent un aspect important de la lutte contre les germes nuisibles et de la promotion de la santé humaine.

Les études récentes soulignent l'importance de ces substances dans le développement d'alternatives naturelles aux antibiotiques, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans le domaine de la santé et de la médecine.

En fin de compte, l'interaction entre les bactéries lactiques et les bactériocines illustre l'innovation naturelle et l'incroyable capacité de la nature à offrir des solutions efficaces aux problèmes de santé et industriels.

La recherche continue dans ce domaine constitue une étape importante vers l'exploitation durable de ces micro-organismes, améliorant ainsi notre qualité de vie.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

1. Adams MR, Moss MO. (2000). Food Microbiology. Second Edition, The Royal Society of Biochemistry éd. Cambridge. UK. pp. 318-323
2. Aljohani, A. B., Al-Hejin, A. M., &Shori, A. B. (2023). Bacteriocins as promising antimicrobial peptides, definition, classification, and their potential applications in cheeses. *Food Science and Technology*, 43, e118021.
3. Amensag, K. (2019). Les bactéries lactiques isolées d'aliments traditionnels marocains : production de bactériocines et applications potentielles contre des pathogènes multirésistants aux antibiotiques (Doctoral dissertation, Université de Strasbourg; Université Sidi Mohamed ben Abdellah (Fès, Maroc)),p 20
4. Ammor, S., Rachman, C., Chaillou, S., Prévost, H., Dousset, X., Zagorec, M., ...&Chevallier, I. (2005). Phenotypic and genotypic identification of lactic acid bacteria isolated from a small-scale facility producing traditional dry sausages. *Food Microbiology*, 22(5), 373-382.
5. Antoshina, D. V., Balandin, S. V., & Ovchinnikova, T. V. (2022). Structural features, mechanisms of action, and prospects for practical application of class II bacteriocins. *Biochemistry (Moscow)*, 87(11), 1387-1403.
6. Arbulu, S., &Kjos, M. (2024). Revisiting the Multifaceted Roles of Bacteriocins: The Multifaceted Rolesof Bacteriocins. *MicrobEcol*, 87(1), 41.<https://doi.org/10.1007/s00248-024-02357-4>
7. Axelsson L,(2004). Classification and physiology in: lactic acid bacteria: microbiological and functional aspects.
8. Bahrami, S., Andishmand, H., Pilevar, Z., Hashempour-baltork, F., Torbati, M., Dadgarnejad, M., Rastegar, H., Mohammadi, S. A., &Azadmard-Damirchi, S. (2024). Innovative perspectives on bacteriocins: advances in classification, synthesis, mode of action, and food industry applications. *Journal of Applied Microbiology*, 135(11). <https://doi.org/10.1093/jambio/lxae274>
9. Béal, C., Marin, M., Fontaine, E., Fonseca, F., Obert, J. P., Corrieu, G., &Luquet, F. M. (2008). Bactéries lactiques, de la génétique aux ferments. Paris : Lavoisier. pp 1–152.
10. Benchenni, A., (2019). Caractérisation phénolique de la lactobacillusautochtones et évaluation de leurpotentieltechnologique et probiotique. Université de Mostaganem

11. Bhattacharya, D., Nanda, P. K., Pateiro, M., Lorenzo, J. M., Dhar, P., & Das, A. K. (2022). Lactic Acid Bacteria and Bacteriocins: Novel Biotechnological Approach for Biopreservation of Meat and Meat Products. *Microorganisms*, 10(10), 2058. <https://www.mdpi.com/2076-2607/10/10/2058>
12. Biavati B., Vescovo M., Torriani S., Bottazzi V. (2000). *Bifidobacteria*: history, ecology, physiology and applications. *Annales of Microbiology.*, 50, 117.
13. Boudaoued, K & Sehaki, R. S. (2021). Etude bibliographique sur la production des bactériocines par les bactéries lactiques (master dissertation, Université Ziane Achour - Djelfa). p8
14. Boumediene, K. (2013). Recherche des bactéries lactiques productrices des bactériocines et l'étude de leur effet sur des bactéries néfastes. *MEMOIRE de Magister en Biologie, Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen. p1.*
15. Bridier, J. (2011). *Étude de la diversité intraspécifique de l'espèce Oenococcus oeni, relation entre variabilité phénotypique et diversité génétique* (Doctoral dissertation). p18
16. Chadi. A., Tarchi, H. (2023). Etude bibliographique sur les bactéries lactiques (master dissertation, university Mohamed Boudiaf -MSILA).
17. Chen, X., Bai, H., Mo, W., Zheng, X., Chen, H., Yin, Y., Liao, Y., Chen, Z., Shi, Q., Zuo, Z., Liang, Z., & Peng, H. (2025). Lactic Acid Bacteria Bacteriocins: Safe and Effective Antimicrobial Agents. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(9), 4124. <https://www.mdpi.com/1422-0067/26/9/4124>
18. Cheurfi, S., & Aouidat, F. Z. (2021). L'étude de l'utilisation des bactéries lactiques genre lactobacillus dans l'industrie agro-alimentaire. p9- 21
19. Collins, M. D., Samelis, J., Metaxopoulos, J., and Wallbanks, S. (1993). Taxonomic studies on some Leuconostoc-like organisms from fermented sausages: description of a new genus *Weissella* for the *Leuconostocparamesenteroides* group of species. *J. Appl. Bacteriol.* 75, 595.
20. Contessa, C. R., da Rosa, J. V., de Ávila, M. T., da Rosa, G. S., Moraes, C. C., & Burkert, J. F. d. M. (2025). Chemical and Biotechnological Processes Employed as Emerging Technologies for the Production and Stability of Bacteriocins. *Processes*, 13(1), 44. <https://www.mdpi.com/2227-9717/13/1/44>

21. Corrieu G. Luquet FM. (2008). The taxonomy of lactic acid bacteria. In: « Bactéries lactiques, de la génétique aux ferments ». TEC&DOC/ Lavoisier éd. Paris. France. 19-106.
22. Cui, Y., Luo, L., Wang, X., Lu, Y., Yi, Y., Shan, Y., Liu, B., Zhou, Y., & Lü, X. (2021). Mining, heterologous expression, purification, antibactericidal mechanism, and application of bacteriocins: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), 863-899. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12658>
23. Daba, G. M., & Elkhateeb, W. A. (2024). Ribosomally synthesized bacteriocins of lactic acid bacteria: Simplicity yet having wide potentials—A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 256, 128325.
24. De Vos P. Garrity GM. Jones D. Krieg NR. Ludwig W. Rainey FA. Schleifer KH. Whitman WB. (2009). Genus *Lactobacillus*, *Bacillus* and *Listeria*. In : « Bergey's manual of systematic bacteriology - The Firmicutes » Vol 3. Springer éd., New York. pp.19-511.
25. Dellaglio, F., De Roissart, H., Torriani, S., Curk, M. C., & Janssens, D. (1994). Caractéristiques générales des bactéries lactiques. In *Bactéries lactiques* (Vol. 1, pp. 3-94). Loriga.
26. Dworkin, M., Falkow, S., Rosenberg, E., Schleifer, K. & Stackebrandt, E. (2006). *The prokaryotes: a handbook on the biology of bacteria* (Vol. 1). New York: Springer. P211
27. El idrissi, H. M. (2017). Bactéries lactiques : usage alimentaire. (Doctoral dissertation). p24-30
28. Fernandes, A., & Jobby, R. (2022). Bacteriocins from lactic acid bacteria and their potential clinical applications. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 194(10), 4377-4399. <https://doi.org/10.1007/s12010-022-03870-3>
29. Fischer, S., López-Ramírez, V., & Asconapé, J. (2024). Historical advancements in understanding bacteriocins produced by rhizobacteria for their application in agriculture. *Rhizosphere*, 31, 100908. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100908>
30. Fusco, V., Quero, G. M., Cho, G. S., Kabisch, J., Meske, D., Neve, H., & Franz, C. M. (2015). The genus *Weissella*: taxonomy, ecology and biotechnological potential. *Frontiers in microbiology*, 6, p2.

31. Garcia-Gutierrez, E., O'Connor, P., Saalbach, G., Walsh, C., Hegarty, J., Guinane, C., Mayer, M., Narbad, A., & Cotter, P. (2020). First evidence of production of the lantibiotic nisin P. *Sci Rep* 10: 3738. In.
32. Hadadji, M. (2007). Caractérisation Microbiologique et Biochimique des Bifidobactéries isolées à partir des selles de nourrissons : Etude des *critères Technologiques et Thérapeutiques* (Doctoral dissertation, Université d'Oran1-Ahmed Ben Bella).
33. Hansal, N. (2015). Isolement, purification, identification et étude des caractéristiques biotechnologiques de *leuconostocmesenteroides* isolé à partir du lait cru de chèvre et de chamelle. p33
34. Hassan, M. U., Nayab, H., Rehman, T. U., Williamson, M. P., Haq, K. U., Shafi, N., & Shafique, F. (2020). Research Article Characterisation of Bacteriocins Produced by *Lactobacillus* spp. Isolated from the Traditional Pakistani Yoghurt and Their Antimicrobial Activity against Common Foodborne Pathogens.
35. Hernández-González, J. C., Martínez-Tapia, A., Lazcano-Hernández, G., García-Pérez, B. E., & Castrejón-Jiménez, N. S. (2021). Bacteriocins from lactic acid bacteria. A powerful alternative as antimicrobials, probiotics, and immunomodulators in veterinary medicine. *Animals*, 11(4), 979.
36. Holzapfel, W. H., Haberer, P., Geisen, R., Björkroth, J. & Schillinger, U. (2001). Taxonomy and important features of probiotic microorganisms in food and nutrition. *The American journal of clinical nutrition*, 73, 365s-373s.
37. Hussain, W., Yang, X., Ullah, M., Wang, H., Aziz, A., Xu, F., Asif, M., Ullah, M. W., & Wang, S. (2023). Genetic engineering of bacteriophages: Key concepts, strategies, and applications. *Biotechnology Advances*, 64, 108116.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108116>
38. Li, R., Duan, J., Zhou, Y., & Wang, J. (2023). Structural basis of the mechanisms of action and immunity of lactococcin A, a class IId bacteriocin. *Applied and Environmental Microbiology*, 89(3), e00066-00023.
39. Li, Z., Li, Y., Xiao, C., Yan, Z., Pan, R., Gao, Y., Li, B., Wei, J., Qiu, Y., Liu, K., Shao, D., & Ma, Z. (2022). Genomic and metabolic features of the *Lactobacillus sakei* JD10 revealed potential probiotic traits. *Microbiological Research*, 256, 126954.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126954>

40. Liang, Q., Zhou, W., Peng, S., Liang, Z., Liu, Z., Zhu, C., & Mou, H. (2025). Current status and potential of bacteriocin-producing lactic acid bacteria applied in the food industry. *Current Research in Food Science*, 10, 100997. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.100997>
41. Liu, G., Nie, R., Liu, Y., & Mehmood, A. (2022). Combined antimicrobial effect of bacteriocins with other hurdles of physicochemic and microbiome to prolong shelf life of food: A review. *Science of the Total Environment*, 825, 154058.
42. Medeiros-Silva, J., Jekhmane, S., Paioni, A. L., Gawarecka, K., Baldus, M., Swiezewska, E., Breukink, E., & Weingarth, M. (2018). High-resolution NMR studies of antibiotics in cellular membranes. *Nature communications*, 9(1), 3963.
43. Mercado, V., & Olmos, J. (2022). Bacteriocin production by *Bacillus* species: Isolation, characterization, and application. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 14(6), 1151-1169.
44. Millette, M. (2007). Étude de bactéries lactiques à potentiel probiotique et de leurs métabolites. Institut National de la Recherche Scientifique (Canada).
45. Mokoena, M. P. (2017). Lactic Acid Bacteria and Their Bacteriocins: Classification, Biosynthesis and Applications against Uropathogens: A Mini-Review. *Molecules*, 22(8). <https://doi.org/10.3390/molecules22081255>
46. Nahal, A., (2016). Etude de l'activité antimicrobienne de bactéries lactiques vis à vis des bactéries pathogènes (Doctoral dissertation, Université IBN-KHALDOUN-Tiaret-Institut de Vétérinaire). p3 .4
47. Negash, A. W., & Tsehai, B. A. (2020). Current applications of bacteriocin. *International Journal of Microbiology*, 2020(1), 4374891.
48. Öztürk, B., & Şengün, İ. (2024). Bacteriocins as Food Bio-preservatives: Mechanism of Action, Purification and Characterization. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 12(s2), 2375-2397. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v12is2.2375-2397.6749>
49. Patil, M. M., Pal, A., Anand, T., & Ramana, K. V. (2010). Isolation and characterization of lactic acid bacteria from curd and cucumber.

50. Pérez-Ramos, A., Madi-Moussa, D., Coucheney, F., & Drider, D. (2021). Current Knowledge of the Mode of Action and Immunity Mechanisms of LAB-Bacteriocins. *Microorganisms*, 9(10), 2107. <https://www.mdpi.com/2076-2607/9/10/2107>
51. Pilevar, Z., Hosseini, H., Beikzadeh, S., Khanniri, E., & Alizadeh, A. M. (2020). Application of bacteriocins in meat and meat products: An update. *Current Nutrition & Food Science*, 16(2), 120-133.
52. Radaic, A., de Jesus, M. B., & Kapila, Y. L. (2020). Bacterial anti-microbial peptides and nano-sized drug delivery systems: The state of the art toward improved bacteriocins. *Journal of Controlled Release*, 321, 100-118.
53. Renouf, V., Claisse, O., et Lonvaud-Funel, A. (2007). Inventory and monitoring of wine microbial consortia. *Appl. Microbiol. Biotechnol* 75, 149.
54. Robrish, S. A., Fales, H. M., Gentry-Weeks, C., & Thompson, J. (1994). Phosphoenolpyruvate-dependent maltose: phosphotransferase activity in *Fusobacterium mortiferum* ATCC 25557: specificity, inducibility, and product analysis. *Journal of bacteriology*, 176(11), 3250-3256.
55. Saidi, Y., (2020). Biodiversité de la microflore lactique du lait cru de dromadaire et évaluation de ses caractéristiques technologiques.
56. Salminen, S., Wright, A. V., Ouwehand, A. (2004). Lactic acid bacteria. microbiological and functional aspects. Marcel Dekker. Inc., U.S.A.
57. Schleifer, K. H., & Ludwig, W. (1995). Phylogenetic relationships of lactic acid bacteria. In *The genera of lactic acid bacteria* (pp. 7-18). Boston, MA: Springer US.
58. Sharma, K., Kaur, S., Singh, R., & Kumar, N. (2021). Classification and mechanism of bacteriocin induced cell death: a review: bacteriocin classification and their mode action. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, 11(3), e3733-e3733.
59. Sidooski, T., Brandelli, A., Bertoli, S. L., Souza, C. K. d., & Carvalho, L. F. d. (2019). Physical and nutritional conditions for optimized production of bacteriocins by lactic acid bacteria—A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(17), 2839-2849.
60. Siegumfeldt H. Rechinger K. B. et Jakobsen M. (2000). Dynamic changes of intercellular pH in individual lactic acid bacterium cells in response to a rapid drop in extracellular pH. *Appl. Environ. Microbiol.* 66, 2330-2335.

61. Simons, A., Alhanout, K., & Duval, R. E. (2020). Bacteriocins, antimicrobial peptides from bacterial origin: Overview of their biology and their impact against multidrug-resistant bacteria. *Microorganisms*, 8(5), 639.
62. Singhal, R., Meena, K. K., Meghwal, D., Gupta, L., Panwar, N. L., & Meena, S. (2023). Bacteriocin producing lactic acid bacteria from camel milk and its fermented products: A review. *Annals of Phytomedicine*, 12(2), 208-215.
63. Soltani, S., Hammami, R., Cotter, P. D., Rebuffat, S., Said, L. B., Gaudreau, H., Bédard, F., Biron, E., Drider, D., & Fliss, I. (2021). Bacteriocins as a new generation of antimicrobials: toxicity aspects and regulations. *FEMS Microbiology Reviews*, 45(1), fuaa039.
64. Sugrue, I., Ross, R. P., & Hill, C. (2024). Bacteriocin diversity, function, discovery and application as antimicrobials. *Nature Reviews Microbiology*, 22(9), 556-571.
65. TAIBA, I., BOULDIEB, A., BENLAZREG, I., (2022). Les bactériocines des bactéries lactiques : une alternative prometteuse pour la bioconservation des aliments (Doctoral dissertation, university center of abdalhafidboussouf-MILA).
66. Tamine A.Y et Robinson R.K. (2003). *Yogurt. Science and technologie*. CRC press New York. P 661.
67. Vishwanatha T., et al "Bacteriocins: Properties and Potential Applications in Food and Pharmaceutical Industry". *Acta Scientific Microbiology* 7.1 (2024): 66-76.
68. Wallace, T. D., Bradley, S., Buckley, N. D. & Green-Johnson, J. H. (2003). Interactions of lactic acid bacteria with human intestinal epithelial cells: Effects on cytokine production. *Journal of Food Protection* 2003. Vol. 66 (3) : 466-472
69. Yaghoubi, A., Khazaei, M., Jalili, S., Hasanian, S. M., Avan, A., Soleimanpour, S., & Cho, W. C. (2020). Bacteria as a double-action sword in cancer. *Biochim Biophys Acta Rev Cancer*, 1874(1), 188388. <https://doi.org/10.1016/j.bbcan.2020.188388>
70. Yang, E., Fan, L., Yan, J., Jiang, Y., Doucette, C., Fillmore, S., & Walker, B. (2018). Influence of culture media, pH and temperature on growth and bacteriocin production of bacteriocinogenic lactic acid bacteria. *AMB Express*, 8(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0536-0>

71. Yang, S. C., Lin, C. H., Sung, C. T., & Fang, J. Y. (2014). Antibacterial activities of bacteriocins: application in foods and pharmaceuticals. *Front Microbiol*, 5, 241. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00241>
72. Yann D., (2003). Production en continu de ferments lactiques probiotiques par les techniques des cellules immobilisées. Thèse Présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor.
73. Yi, Y., Li, P., Zhao, F., Zhang, T., Shan, Y., Wang, X., Liu, B., Chen, Y., Zhao, X., & Lü, X. (2022). Current status and potentiality of class II bacteriocins from lactic acid bacteria: structure, mode of action and applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 120, 387-401.
74. Zimina, M., Babich, O., Prosekov, A., Sukhikh, S., Ivanova, S., Shevchenko, M., & Noskova, S. (2020). Overview of global trends in classification, methods of preparation and application of bacteriocins. *Antibiotics*, 9(9), 553.

Annexe1: Classification des bactéries lactiques

Phylum : *Fermicutes*.

Classe : *Bacilli*

Ordre : *Lactobacillale*

Famille : *Lactobacillaceae*

Genre : *Lactobacillus*

Genre : *Pediococcus*

Famille : *Carnobacteriaceae*

Genre : *Carnobacterium*

Famille : *Leuconostocaceae*

Genre : *Leuconostoc*

Genre : *Oenococcus*

Genre : *Weisella*

Famille : *Streptococcaceae*

Genre : *Lactococcus*

Genre : *Streptococcus*

Famille : *Enterococcaceae*

Genre : *Enterococcus*

Genre : *Tétragonococcus*

Genre : *Vagococcus*

Famille : *Aerococcaceae*

Genre : *Aerococcus*

Le genre *Bifidobacterium* appartient à la famille des *bifidobacteriaceae*
ordre des *bifidobacteriales* , classe *Actinobacteria*